

# В одну телегу впрячь ВОЗМОЖНО

Кандидат  
физико-математических наук  
**Л.А.Ашкинази**

## Классы и гибриды

Есть вещи, о которых каждый человек что-то слышал — независимо от его специальности. Любой технарь знает, что именно рисовал Айвазовский, а гуманитарий слышал что-то об электронных лампах и транзисторах. Первые — это такие стеклянные и сейчас вроде бы не применяются, а транзисторы — это такое маленькое, и еще слово «силициум». Для технаря здесь ошибок столько же, сколько слов, плюс безграмотность, ну да ладно. Читатели нашего журнала эту головоломку решат легко...

Деление объектов на классы — общенаучная методика. Биолог делит зверей на виды, технарь отличает паровозы от паровых автомобилей, а электромобиль и даже электровоз — от электромотриссы. Деление на классы является следствием понимания и само помогает понимать, но оно и не абсолютно, и не постоянно. Всегда есть возможность обнаружить или создать объект, который «не лезет в ворота», и всегда остается возможность, что он появится завтра. Неучи и сумасшедшие (иногда с большими научными погонями) ежедневно опровергают теорию относительности, но ни один нормальный физик не скажет, что ее уточнение и дополнение невозможны в принципе.

Философы могут до падения гигантского метеорита на Землю обсуждать, объективно ли существование класса, но мы-то твердо знаем, что, если сесть на электронную лампу и на транзистор, и тактильное ощущение, и звук будут разными. В мире людей разницу между вещами отражает специализация ученых и инженеров, нечеткость и подвижность границ — изучение опыта «соседей по фронту» и заимствование методов и решений. Когда-то мы писали о гибридных приборах (1986, № 1, с. 34), но, как и следовало ожидать, ситуация изменилась — стало ясно (на какое-то время...), каким из существующих приборов суждено развиваться, скажем осторожно, в ближайшее десятилетие. Это — вакуумные интегральные схемы (ВИС).

В уже сложившейся области применения никто не станет переходить с ламп или транзисторов на никому не известные гибриды «ужа с ежом». Здоровый консерватизм заказчиков разумно ограничивает безудержный полет фантазии разработчиков. Хорошие шансы на внедрение чего-то нового есть в новых областях применения, где заказчик вынужден «сбавить тон» и вежливо слушать разработчика. Направления развития техники можно классифицировать по изменяющимся параметрам — увеличение мощности, количества элементов на чипе, термостойкости и т.д. Поэтому у виратора, о котором мы недавно писали, перспективы радужные — аргумент «самая большая мощность» не опоришь. У вакуумных интегральных схем ситуация сложнее — меньше транзисторов их пока делать не научились, поэтому аргумент в их защиту много лет носил комбинированный характер — они-де термо- и ра-

диационностойкие и не намного больше транзисторов. Звучит это менее убедительно, и поэтому путь их развития оказался столь долог.

## Принцип и устройство

Принцип действия электронной лампы прост — катод эмитирует электроны, электрическое поле управляет их движением, электроны в большем или меньшем количестве прилетают на анод. Ток в цепи сетки мал или вообще отсутствует — поэтому и мощность для управления нужна малая, а напряжение на аноде может быть большим, значит, и управляемая мощность может быть большой. Из этого короткого описания видно, что полупроводники лампе не нужны: следовательно, она может быть термо- и радиационно-стойкой, вакуум — сегодня не вопрос, а что касается габаритов, то традиционными способами лампу размером в 10 мкм действительно не сделать, но разве зря полупроводниковая техника столько лет развивалась? Возьмем технологию из нее: на изолирующую подложку нанесем проводящую пленку, на нее — слой изолятора, потом проводник, потом опять изолятор, вытравим в этом слоеном пироге цилиндрический колодец до первого проводника и сверху напылим сплошной слой, который закроет колодец крышкой.

Мы получили электронную лампу: первый проводящий слой — катод, второй — сетка, третий — анод. Правда, у этой лампы несколько необычная геометрия — но теоретики и не такое умеют обсчитывать; необычная, мягко говоря, конструкция — но зря, что ли, за полупроводники Нобелевские премии и «Глобальные энергии» дают? Пусть хоть от их полупроводниковых технологий лампам польза будет. Одно плохо — чтобы катод эмиттировал, его (при условии изготовления из вполне определенных веществ, да по непростой технологии) надо греть хотя бы до 700°С. Процессор, который работает, только если нагреть его до красного каления, — это, как сказали бы мои студенты, круто. Но дело не в крутизне, а в том, что при этих температурах скорость диффузии велика и наши диэлектрики шустренько перемешаются с нашими проводниками. Почему этого не происходит в обычной лампе? Да потому, что в ней нагрет только катод! А обеспечить в твердом теле на расстоянии в десять микрон перепад температуры в сотни градусов не получится.

Возникает естественная мысль — обойтись без термокатада. Пожалуйста: существует фотоэмиссия. Правда, непонятно, как освещать катод через металлическую крышку колодца... Хотя тонкие пленки некоторых металлов, говорят, полупрозрачны, да кстати существует фотоэмиссия не «на отражение» — при засветке из колодца, а «на прострел», при засветке со стороны подложки. А уж сделать прозрачную подложку — хоть из сапфира, хоть из ситалла — вообще не вопрос. Почему же С.А.Спиндт из Стэнфорда придумал в 1973 году вакуумную интегральную схему не с фотоэмиссией, а с эмиссией автоэлектронной? Никто этого не знает; тем более до применения автоэмиссии было доду-



маться труднее. (Существует еще одно, несколько более экзотическое решение — но мы о нем поговорим позже.) Просто потому, что автоэлектронная эмиссия требует больших электрических полей и, как мы привыкли, больших напряжений. А фотоэмиссия не требует никаких! Тем не менее — так легли карты, или, если угодно, так встали звезды, что он придумал то, что придумал. В том самом Стэнфорде, где братья Варияны когда-то изобрели пролетный клистрон — генератор СВЧ-колебаний, где позже поставили мировой рекорд его мощности, где построили самый большой линейный ускоритель и еще много чего.

При большой напряженности поля на катоде потенциальный барьер делается тонким и электроны из катода туннелируют в вакуум, проходят «сквозь», не тратя энергии. Это принципиально квантово-механический эффект, никаким наглядным способом, никак «научно-популярно» объяснить его невозможно, и попытки это сделать — следствие необразованности или жульничества. Человек со своими масштабами живет в не-квантовом мире и весь наш повседневный жизненный опыт, на который опираются популяризаторы, не может в этом случае стать опорой восприятия. Известны немногие эксперименты, когда квантовые эффекты проявляются в макромасштабах, но человек с такими ситуациями просто так не сталкивается. Возможно, что через полвека некоторая часть человечества будет воспринимать все «квантовое» как нечто простое и естественное, вообще не требующее какой-либо популяризации. Действительно, попробуйте человеку догероновских времен объяснить, что значит «падаю на сиденье, пристегиваюсь, жму на газ...». Причем объяснить не как-нибудь, а популярно.

## Автоэмиссия

Раз электрон при автоэмиссии не тратит энергию на выход из металла — значит, металл не надо греть, чего мы и добились. А откуда взять высокую напряженность поля? Она зависит от среднего поля в приборе (отношение внешнего напряжения к величине зазора) и геометрии эмиттера, и для увеличения поля на эмиттере применяются «острые» формы — выступы, нити, острия, лезвия, торцы трубок — или их системы — пучки нитей, пакеты лезвий, углеродные нанотрубки и т.п. Для отбора относительно больших токов используют многоострийные системы, многоэмиттерные системы на краях пленок и фольг и т. п. В зависимости от размеров эмиттеров и расстояния до анода напряжение, обеспечивающее величину электрического поля, достаточную для возникновения автоэлектронной эмиссии, может составлять от сотен вольт до нескольких десятков киловольт.

Ключевой вопрос техники автоэмиттеров — создание и стабилизация «острого» рельефа поверхности. Создается он чаще всего электрохимическим травлением, так как механическим путем получить острие или лезвие с радиусом в десятые доли мкм затруднительно. Второй возможный способ — изготовление не «острого» объекта, а тонкого с последующим его изломом или разрывом. Например, тя-

нутся нити или пучки нитей, их срез или слом становится группой острий. Или берется тонкая фольга, а ее торец, образующийся при разрезании или разрывании, становится острым. Использование торцов тонких нитей в качестве автоэмиттеров сопровождается интересным эффектом: нити некоторых материалов (в частности, углерода) при работе в высоких полях расщепляются, превращаясь в пучок еще более тонких субнитей. Третий способ получения «острого» рельефа — это непосредственное выращивание острий из пара по механизму пар–жидкость–кристалл, когда на подложке растут из конденсирующегося пара тонкие перпендикулярные ей острия. Четвертый способ — напыление через маску, при котором можно получить на подложке острые конусы. Именно этот способ и применяется при изготовлении ВИС.

## Немного о мрачном

То, что в качестве эмиттеров используются не плоскости (как в термокатадах), а острия, имеет важное следствие — непараллельность траекторий электронов. Область высокого поля, в котором электроны приобретают основную энергию, лежит вблизи острия, и поэтому компонента скорости, лежащая параллельно плоскости эмиттирующего электрода и, стало быть, перпендикулярно среднему полю, оказывается велика и может быть даже сравнима с продольной компонентой скорости. Пучок получается расширяющимся, веерным, а если катод многоострийный или многолезвийный, то вообще неламинарным, с пересекающимися траекториями электронов. Поэтому автокатод нельзя, как правило, просто поставить в прибор, предназначенный для использования с термокатодом. Это верно даже для классических низкочастотных электронных ламп (диодов, триодов, пентодов и т.д.), а тем более для СВЧ-приборов, которые почти все работают со сфокусированными, определенным образом сформированными, чаще всего протяженными и почти всегда — ламинарными электронными пучками. Для использования автокатада надо, как правило, специально разрабатывать прибор, и он будет отличаться от прибора, рассчитанного на работу с термокатодом. Лишь в лампе с параллельными и близкими анодом и катодом (и сетками) термокатод и многоострийный автокатод будут работать примерно одинаково.

Для сужения пучка можно попробовать организовать на поверхности одноострийного автокатада «эмиссионный рельеф» — то есть неоднородность работы выхода (аналогичное решение применяется и в термокатадах). Эмиссионный рельеф в автокатадах может образовываться за счет двух процессов. Во-первых, за счет огранки поверхности. Поверхность острия оказывается состоящей из разных кристаллографических граней, и разные грани по-разному эмиттируют. Во-вторых, за счет избирательной сорбции. Например, цирконий сорбируется по-разному на разных участках (гранях) вольфрамового острия, избирательно понижая работу выхода. В целом удается уменьшить угол расхождения

пучка, для обычных автокатодов составляющий от 60° до 100°, до примерно 10°.

Свойства автокатодов имеют интересные следствия для приборов СВЧ. Например, малогабаритность позволяет применять их в СВЧ-приборах самых высоких частот, а высокая крутизна зависимости тока от напряжения — получить при синусоидальном напряжении короткие монохроматические сгустки электронов, эмиттируемые в области максимума напряжения. Поскольку некоторые СВЧ-приборы, в частности упомянутый выше клистрон и не упомянутый выше магнетрон (который стоит в любой СВЧ-печи или, по-нашему, микроволновке), работают именно со сгустками электронов, то катод, сам создающий сгустки, может быть там весьма эффективен. Однако пока имеются лишь отдельные попытки применения автокатодов в этих приборах, точнее — разработки СВЧ-приборов с автокатадами.

## И нитка, втрое скрученная...

Во многих случаях применений автокатодов важны не только или не столько значения плотности токов и электронной яркости, сколько полный ток. Для одноострийного катода он довольно скромный, несмотря на большую плотность тока — ведь все эти  $10^7$ – $10^9$  А/см<sup>2</sup> отбираются с субмикронной площади. Для напряжений порядка 1, 10 или 100 кВ, если мы хотим работать в стационарном режиме и отбирать даже ток предельной плотности  $10^7$  А/см<sup>2</sup>, ток одиночного острия составит  $10^{-3}$ ,  $10^{-1}$  или 10 А соответственно, в то время как и для низкочастотной лампы, и для СВЧ-прибора обычные значения тока при этих напряжениях будут в десятки и сотни раз больше. Поэтому для конкуренции с термокатадами в приборах этих классов автокатады должны быть многоострийными — острий должно быть десятки тысяч.

Многоострийные автокатады позволяют увеличить ток и довести его до значений, обычных для электровакуумной техники. При этом преимущества — отсутствие цепи накала и мгновенная готовность к работе — сохраняются. Термокатады допускают низковольтное или сеточное управление — размещенная над катодом сетка позволяет управлять эмиссией посредством приложения относительно малого — десятки вольт — напряжения. Этот способ применяется в низкочастотных электронных лампах и в некоторых СВЧ-приборах. Над многоострийным автокатодом можно расположить сетку, согласовав отверстия в ней с остриями, но напряжение на ней, необходимое для управления эмиссией, будет слишком велико. Для получения приемлемого напряжения (хотя бы в сотни вольт) зазор между вершинами острий и сеткой должен составлять единицы микрон. И такой катод был изготовлен.



1 Катод Спиндта



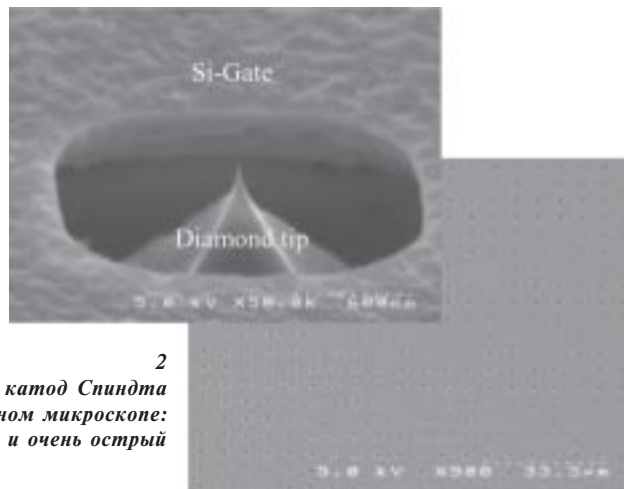
Вот так выглядит катод Спиндта в электронном микроскопе: алмазный и очень острый

На проводящей подложке с помощью последовательных напылений, травлений через слой фоторезиста и окислений формировалась следующая структура: слой изолятора толщиной порядка мкм с отверстиями диаметром порядка мкм, расположенными с шагом в несколько мкм и достигающими до проводящей подложки, тонкий слой проводника, покрывающий этот изолятор (и не закрывающий отверстия в нем), а на дне каждого отверстия — то есть на подложке — проводящий конус, достигающий по высоте до уровня металлического слоя на изоляторе (рис. 1). То есть образовывалась решетка колодцев с автоэмиттером (конусом) на дне, достигающим до его края, и с проводящим покрытием на краю каждого колодца, то есть управляющей сеткой. С таких структур были получены средние по площади токи до 100 А/см<sup>2</sup>, а при средних токах в единицы А/см<sup>2</sup> были получены значения срока службы в десятки тысяч часов. Управляющее напряжение на «сетке» составляло при этом около 200 В. Такой катод вполне сопоставим по своим параметрам с термокатадами, при этом он не нуждается в накале, но имеет большие поперечные скорости электронов. Катады этого типа разрабатываются весьма активно, варьируется геометрия и материалы — в частности, сами конусы-эмиттеры делаются из разных металлов, из кремния, из алмаза (рис. 2). Но алмазная пленка при некоторых условиях сама становится хорошим эмиттером, даже без специальных «конусов».

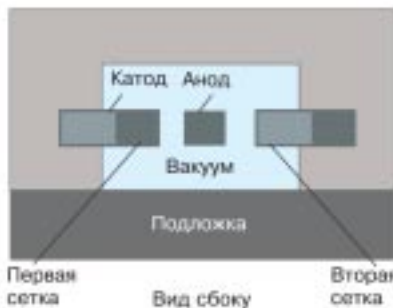
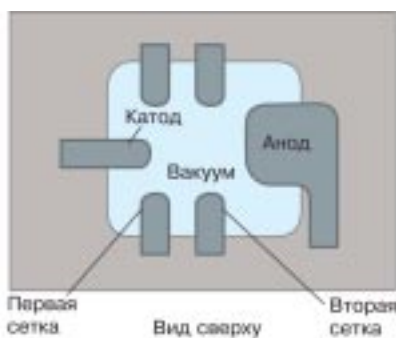
Вам эта структура не показалась мучительно знакомой? Да это же ВИС, только без верхнего электрода (рис. 1)!

## Двух зайцев одним выстрелом

Да, есть шансы их поразить — хотя выстрел сам по себе весьма не прост. Итак, твердотельная структура решает две проблемы. Если эта структура — с верхним электродом, — это сверхминиатюрная электронная лампа, не требующая накала, имеющая размеры порядка 10 мкм, стойкая — как и все электронные лампы — к высоким температурам и радиации. Лампа, изготовленная типичными методами твердотельной микроэлектроники, допускающими, более того — предполагающими изготовление приборов миллионами на одном чипе, в одном технологическом цикле. Если же без верхнего электрода — то это катод, на основе которого можно создавать электронные приборы. Катод, сравнимый по параметрам с обычными, но не требующий накала. Плохо лишь то — плохо с технико-философской точки зрения, — что и в первом, и во втором случае наше детище не решает какие-то свои задачи, а пытается прийти на смену чему-то уже существующему. А существующее не сдаётся — отчасти по упрямству и тупости, отчасти по здоровому консерватизму, отчасти по недостатку свободных средств для инвестиций в новое. А есть ли у ВИСов или у многоострийных катонов с управляющим электродом — катонов Спиндта — своя собственная область применения?



2



3  
**Планарный триод  
 с полевым эмиттером  
 (по материалам  
 университета Вандербильта)**



ТЕХНОЛОГИИ

Похоже, что да, и даже несколько. Первая, наиболее освоенная — дисплей на катодах с полевой эмиссией. Люминофор — обычный, светится он под действием электронов, как обычно, только электроны эти поставляет на экран луч не длинный и тонкий, сформированный электронной пушкой и системой фокусирования и развертки (90% длины вашего монитора — это они, родимые), а эмиттируемый отдельным маленьким катодиком, расположенным близко к экрану. Идея кажется очевидной и разумной, кинескоп получается тонким и плоским, но оказалось, что большие платы с катодами Спиндта дороги и не технологичны. И тут на сцену вышли те самые катоды — тоже, впрочем, автоэлектронные, — которые упоминались ранее, как «экзотическое решение». Они тоже автоэлектронные, но само выдерживание электронов в вакуум и доставка их на экран осуществляются отдельными полями, отдельными напряжениями. Катод состоит не из одного острия, а из двух проводящих частиц (PdO) на подложке, частицы разделены нанометровым зазором, между ними приложено напряжение, электроны эмиттируются в вакуум, а напряжение, приложенное между этими частицами и экраном, подхватывает их и доставляет на экран. И хотя кинескопы с такими катодами уже есть в продаже, но возможно, что острые катоды еще попробуют вернуться на уж очень соблазнительный рынок больших дисплеев. В частности, некоторые надежды связывают с использованием в качестве автоэмиттеров углеродных нанотрубок. А есть еще и неуглеродные нанотрубки; а как вам углеродная с вделанным в конец алмазным кластером? Тут вам и концентрация поля, и отрицательное электронное сродство, и совместимость материалов...

Здесь же заметим, что идея плоского (то есть в плоскости подложки) расположения электродов триода с автоэлектронным катодом (рис. 3) возникла независимо от кинескопа, да и сам катод с эмиссией из одного проводящего островка в другой тоже давно известен, но журнал, как мы неоднократно отмечали, несмотря на развитие полиграфических технологий, не резиновый.

Вторая естественная для ВИС идея применения требует небольшого радиотехнического отступления.

### Третий вид соединения ламп

Лампы (транзисторы, усилительные каскады) в усилителе могут соединяться последовательно — сначала сигнал усиливает первая, потом вторая и т. д. Могут — параллельно, этот способ часто применяется в выходных каскадах — в частности, когда не хватает мощности одного прибора. Существует, однако, и третий способ. Представим себе линию передачи — например, обычную двухпроводную линию или цепочку из индуктивностей. Вдоль линии распространяется волна. К линии с некоторым шагом подключены входы усилительных элементов (для ламп — сетки), а выходы (для ламп — аноды) подключены ко второй линии, в которую каждая лампа посылает усиленный сигнал. Поэтому во второй линии возникает усиленная волна.

В данном случае существует простая механическая аналогия. Представьте себе колонну стоящих одни за другими детских качелей — не тех, которые сиденье на двух веревках, а тех, которые длинная доска на трубе посередине. Если к одним концам привязать веревку и возбудить в ней бегущую волну, эти концы начнут колебаться — если качели легкие, а веревка тяжелая — например, это цепь, которую потерял пролетариат. Вторые концы качелей тоже начнут колебаться, а если к ним приделать веревку, то в ней возбудится волна. Правда, поскольку качели не имеют своего источника мощности, то вторая волна не может иметь мощность больше, чем у первой. Но зато она может иметь большую амплитуду — если качели несимметричны. Читатели с радиотехническим образованием могут тут усмотреть некую аналогию с понятием волнового сопротивления. Но для нас сейчас важно то, что с переходом к миллиметровым и субмиллиметровым волнам, которых техника все больше жаждет, размеры линий передач (сечение, ширина, расстояние между проводниками) уменьшаются. Поэтому паразитные емкости и индуктивности ламп (и транзисторов) становятся все более существенны — а значит, их размеры тоже надо уменьшать. Жизнь — точнее, уравнения Максвелла — заставляет нас обратиться к ВИС, которые и есть самые маленькие лампы, прекрасно конструктивно и технологически согласовывающиеся с интегральными схемами, миллиметровой СВЧ-техникой и т. д. Причем в данном случае речь идет не о термостойкости, радиационной стойкости и т. п., а вообще о возможности реализации.

И в заключение — гибридный прибор подкрался незаметно. Конечно, это шутка. А если говорить серьезно, то полупроводниковая техника, кремниевая с головы до пят, электронная и дырочная до мозга костей, сама пришла к идее гибридного прибора. Действительно, «баллистический транзистор», транзистор, в котором электрон летит от одного электрода к другому через слой полупроводника, но не взаимодействуя с ним, по инерции, разве не похож на маленькую электронную лампу, в которой электроны летят через вакуум?

Правда, у электронно-вакуумной техники тоже рыло в пуху: ибо на протяжении уже 2/3 века самые распространенные катоды (и термо-, и фото-, и вторичноэлектронные) — полупроводниковые, и все их модели это учитывают.

#### Что еще почитать об этом

**Трубецков Д.И.** Вакуумная микроэлектроника, «Соросовский образовательный журнал», 1997, № 4.

**Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В.** Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1996.

**Трубецков Д.И., Храмов А.Е.** Лекции по СВЧ электронике для физиков. М.: Физматлит, 2004.

